

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

Mulai dari tahap perencanaan hingga tahap analisa, penelitian dilaksanakan berdasarkan sumber yang berkaitan dengan topik yang dipilih, yaitu Perhitungan dan Validasi Balok Beton Bertulang dengan Agregat *Slag*.

Materi yang dibahas berdasarkan referensi maupun peraturan mengenai teknologi beton yaitu:

- Teori tentang beton
- Limbah padat (*slag*)
- Material pada beton
- Perencanaan pencampuran beton (*mix design*)
- Penelitian sejenis yang pernah dilakukan

2.2. Teori Tentang Beton

Beton didefinisikan sebagai bahan yang diperoleh dengan mencampurkan agregat halus, agregat kasar, semen portland, dan air tanpa tambahan zat aditif (PBI, 1971). Tetapi akhir-akhir ini definisi beton sudah semakin luas, di mana beton adalah bahan yang terbuat dari berbagai macam tipe semen, agregat, dan juga pozzolan, abu terbang, terak dapur tinggi, sulfur, serat, dan lain-lain (Neville dan Brooks, 1987).

Nilai kekuatan tekan dari beton diketahui dengan melakukan pengujian kuat tekan terhadap benda uji silinder (diameter 5 cm dan tingggi 30 cm) atau kubus (15 x 15 x 15 cm) yang dibebani dengan gaya tekan sampai benda uji hancur.

2.2.1. Kuat Tekan Beton

Kuat hancur antara 20 dan 50 N/mm² pada umur 28 hari biasa diperoleh di lapangan bila pengawasan pekerjaannya baik (L. J Murdock & K. M Brook).

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan beton, yaitu:

1. Faktor Air Semen (FAS) dan kepadatan

Fungsi dari faktor air semen yaitu:

- Memungkinkan reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya pengerasan.
- Sebagai pelicin campuran kerikil, pasir, dan semen agar lebih mudah dalam pencetakan beton.

Kekuatan beton tergantung pada perbandingan faktor air semennya. Semakin tinggi nilai FAS, semakin rendah mutu kekuatan beton, namun demikian, nilai FAS yang semakin rendah tidak selalu berarti bahwa kekuatan beton semakin tinggi. Ada batas-batas dalam hal ini, nilai FAS yang rendah akan menyebabkan kesulitan dalam pengerjaan, yaitu kesulitan dalam pelaksanaan pemadatan yang pada akhirnya akan menyebabkan mutu beton menurun. Umumnya nilai FAS minimum yang diberikan sekitar 0.4 dan maksimum 0.65 (Tri Mulyono, 2004). Sehingga dapat disimpulkan bahwa hampir untuk semua tujuan, beton yang mempunyai faktor air semen minimal dan cukup untuk memberikan workabilitas tertentu yang dibutuhkan untuk pemadatan yang sempurna tanpa pekerjaan pemadatan yang berlebihan, merupakan beton yang terbaik (L. J Murdock & K. M Brook, 1979).

2. Umur Beton

Kuat tekan beton akan bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton tersebut. Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur tersedia pada peraturan Beton Betulang Indonesia 1971.

3. Jenis dan Jumlah Semen

Jenis semen berpengaruh terhadap kuat tekan beton, sesuai dengan tujuan penggunaannya. Jenis-jenis semen disesuaikan dengan SK SNI S-04-1989-F.

4. Sifat agregat

Sifat agregat yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton adalah:

- Kekasaran permukaan, di mana agregat dengan permukaan kasar akan terjadi ikatan yang baik antara pasta semen dengan agregat tersebut
- Kekerasan agregat kasar

- Gradasi agregat

2.3. Limbah Padat (*Slag*)

Slag adalah limbah padat dari proses peleburan baja. *Slag* dihasilkan selama proses pemisahan cairan baja dari bahan pengotornya pada tungku-tungku baja.

Pada peleburan baja, bijih besi atau besi bekas dicairkan dengan kombinasi batu gamping, dolomite atau kapur. Pembuatan baja dimulai dengan penghilangan ion-ion pengotor baja, di antaranya aluminium, silikon, dan fosfor. Ion-ion tersebut akan menyebabkan baja menjadi tidak keras dan mudah rapuh atau sulit untuk dibentuk menjadi lembaran-lembaran baja. Untuk penghilangan ion pengotor tersebut diperlukan kalsium yang terdapat pada batu kapur. Campuran kalsium dan aluminium, silikon, dan fosfor membentuk *slag*. *Slag* mengambang pada permukaan cairan baja, kemudian dibuang. *Slag* terbentuk pada suhu 1580°C dan akan tersesuai seperti kaca, berbentuk tidak beraturan dan mengeras ketika dingin. *Slag* dapat berupa butiran halus sampai berupa balok-balok besar yang sangat keras. *Slag* juga mengandung logam berat yang tinggi. (Sumber: PT. Inti General Yaja Steel, Semarang).

2.3.1. Kegunaan Limbah Padat (*Slag*)

Secara fisik *slag* lebih kaku, lebih padat dan keras dibandingkan agregat kasar alam. *Slag* dapat digunakan sebagai material jalan sebagai pondasi, produksi semen, stabilisasi tanah, pertanian, media pengolahan air limbah, dan sebagainya. (Sumber: *The National Slag Association*). Hal ini membuktikan bahwa *slag* dapat dimanfaatkan kembali dengan tetap memperhatikan lingkungan.

2.3.2. Karakteristik Limbah padat (*Slag*)

Karakteristik dari limbah padat (*slag*) yaitu:

1. Karakteristik Fisik

Limbah padat (*slag*) mempunyai butiran partikel berpori pada permukaannya. Limbah padat (*slag*) yang telah dipecah merupakan

material dengan gradasi yang baik, dengan variasi ukuran partikel yang berbeda-beda. Ukuran gradasi limbah padat (*slag*) lebih mendekati ukuran agregat kasar $\frac{1}{2}$.

2. Karakteristik Kimia

Komposisi kimia limbah padat (*slag*) pada PT. Inti General Yaja Steel Semarang dari hasil analisa pengujian Laboratorim Balai Riset dan Standardisasi Industri dan Perdagangan Semarang, dapat dilihat pada tabel 2.1. di bawah ini.

Tabel 2.1. Komposisi Kimia dari Limbah Baja (*Slag*)

No	Parameter	Satuan	Hasil Analisa	Metode Uji
I	LOGAM BERAT			
1	Arsen (As)	mg/kg	< 0.118	Destruksi SM. 3114 B
2	Barium (Ba)	mg/kg	< 3.931	Destruksi SM. 3111 D
3	Boron (B)	mg/kg	< 1.965	Destruksi SM. 4500-BC
4	Cadmium (Cd)	mg/kg	< 0.118	Destruksi SM. 3111 B
5	Chromium (Cr)	mg/kg	49.25	Destruksi SM. 3111 B
6	Copper (Cu)	mg/kg	48.42	Destruksi SM. 3111 B
7	Lead (Pb)	mg/kg	< 1.179	Destruksi SM. 3111 B
8	Mercury (Hg)	mg/kg	< 0.393	Destruksi SM. 3112 B
9	Selenium (Se)	mg/kg	< 0.118	Destruksi SM. 3114 B
10	Silver (Ag)	mg/kg	< 1.179	Destruksi SM. 3111 B
11	Zinc (Zn)	mg/kg	28.62	Destruksi SM. 3111 B

Metode uji mengacu pada: *Standard Methods for the Examination of Water and Waste, APHA, AWWA, WEF*

(Sumber: TA Vena-Zuni: 2006)

Dari komposisi kimia limbah padat (*slag*) di atas, sangat jelas bahwa limbah padat (*slag*) termasuk dalam limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya). Namun dalam penelitian sebelumnya (Vena – Zuni: 2005) melalui uji perlindian yang mereka lakukan dapat diketahui bahwa laju perlindian menurun karena

faktor pembagi hari perendaman pada saat yang bersamaan yang digunakan untuk mencari laju perindian. Selain itu, laju perindian menurun dikarenakan faktor pembentukan ikatan semen dengan air dan agregat dalam beton yang semakin lama semakin kuat sehingga kandungan kimia dalam limbah padat (*slag*) sulit untuk dapat keluar. Dari penelitian tersebut juga diketahui bahwa beton dengan menggunakan campuran *slag* di dalamnya pada usia 28 memiliki nilai perindian adalah 0 (nol). Hal ini adalah sesuatu yang sangat mendasar dan merupakan nilai positif untuk membuktikan bahwa limbah padat (*slag*) dapat digunakan sebagai pengganti agregat kasar (split) tanpa merusak lingkungan.

2.4. Material

Material penyusun pada beton dengan campuran limbah padat (*slag*) ini mempunyai karakteristik yang berbeda bila digunakan sebagai bahan adukan dalam beton. Maka perlu diketahui sifat dan karakteristik masing-masing material penyusun agar dalam pelaksanaannya mencapai mutu yang diinginkan.

2.4.1. Semen Portland (PC)

Portland cement (PC) atau lebih dikenal dengan semen berfungsi membantu pengikatan agregat halus dan agregat kasar apabila tercampur dengan air. Selain itu semen juga mampu mengisi rongga-rongga antara agregat tersebut.

1. Sifat Kimia Semen

Kadar kapur yang tinggi tetapi tidak berlebihan cenderung memperlambat pengikatan, tetapi menghasilkan kekuatan awal yang tinggi. Kekurangan zat kapur menghasilkan semen yang lemah, dan bilamana kurang sempurna pembakarannya, menyebabkan ikatan yang cepat (L. J Murdock dan K. M Brook, 1979). Sifat kimia serta komposisi semen sesuai Teknologi Beton (Tri Mulyono, 2004).

2. Sifat Fisik Semen

Sifat fisik semen portland, yaitu:

a. Kehalusan butir

Semakin halus semen, maka permukaan butirannya akan semakin luas, sehingga persenyawaannya dengan air akan semakin cepat dan membutuhkan air dalam jumlah yang besar pula.

b. Berat jenis

Berat jenis semen pada umumnya berkisar 3.15 kg/liter.

c. Waktu pengerasan semen

Pada pengerasan semen dikenal dengan adanya waktu pengikatan awal (*initial setting*) dan waktu pengikatan akhir (*final setting*). Waktu pengikatan awal dihitung sejak semen tercampur dengan air hingga mengeras. Pengikatan awal untuk semua jenis semen harus di antara 60 – 120 menit.

d. Kekekalan bentuk

Pasta semen yang dibuat dalam bentuk tertentu dan bentuknya tidak berubah pada waktu mengeras, maka semen tersebut mempunyai sifat kekal bentuk.

e. Pengerasan awal palsu

Gips yang terurai lebih dulu dapat menimbulkan efek pengerasan palsu, seolah-olah semen tersebut mulai mengeras tetapi pengaruhnya terhadap sifat semen tidak berubah. Pengerasan palsu biasanya terjadi jika semen mengeras kurang dari 60 menit.

f. Pengaruh suhu

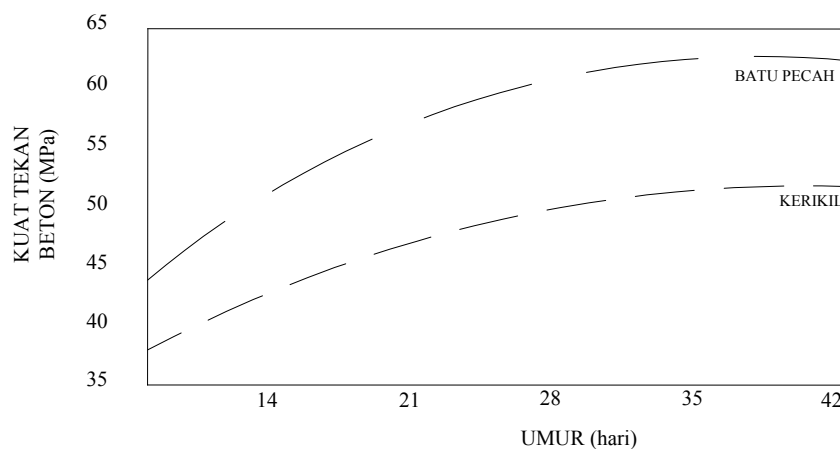
Pengikatan semen berlangsung dengan baik pada suhu 35 °C dan berjalan dengan lambat pada suhu di bawah 15 °C.

2.4.2. Agregat

Pada beton konvensional, digunakan agregat alam dan campurannya, di mana pengertian agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Kira-kira 70% volume mortar atau beton diisi oleh agregat. Dari hal tersebut, peranan agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar atau beton, sehingga pemilihan agregat

merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar atau beton. Sedangkan dari keseluruhan kebutuhan agregat pada beton, agregat kasar mempunyai porsi yang lebih tinggi dibanding dengan agregat halus, sehingga secara keseluruhan material pembentuk beton sangat didominasi oleh agregat kasar.

Fungsi agregat kasar pada beton adalah sebagai kekuatan pada beton. Berdasarkan hal tersebut, pengaruh kekuatan agregat terhadap beton sangat besar. Adapun faktor yang mempengaruhi kekuatan agregat pada beton yaitu kekerasan agregat, kekasaran permukaan agregat, dan gradasi agregat. Pada agregat dengan permukaan kasar akan terjadi ikatan yang baik antara pasta semen dengan agregat tersebut, seperti dapat dilihat pada grafik 2.1. Batu pecah (split) memiliki permukaan yang lebih kasar daripada kerikil sehingga memberikan kuat tekan yang lebih tinggi pada beton.



Grafik 2.1. Pengaruh Jenis Agregat Terhadap Kuat Tekan Beton

Agregat umumnya digolongkan menjadi tiga kelompok, yaitu:

- Batu, umumnya besar butiran lebih dari 40 mm
- Kerikil, untuk butiran 5 sampai 40 mm
- Pasir, untuk butiran antara 0.15 sampai 5 mm

2.4.2.1. Berat Jenis Agregat

Menurut berat jenisnya agregat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Agregat normal

Agregat normal memiliki berat jenis antara 2.5 kg/dm^3 dan 2.7 kg/dm^3 atau tidak boleh kurang dari 1.2 kg/dm^3

2. Agregat berat

Agregat berat memiliki berat jenis lebih besar dari 2.8 kg/dm^3

3. Agregat ringan

Agregat ringan memiliki berat jenis kurang dari 2.0 kg/dm^3

2.4.2.2. Gradasi Agregat

Gradasi agregat adalah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori di antara butiran yang lebih besar, sehingga pori-pori menjadi sedikit, dengan kata lain kemampatan tinggi (Tjokrodinuljo, 1996).

2.4.2.3. Hubungan antara Pori dalam Mortar dan Beton dengan Kekuatan

Kekuatan mortar akan bertambah jika kandungan pori dalam mortar semakin kecil (R. Feret, 1897). Semakin tinggi angka pori dalam agregat berarti semakin tinggi angka pori dalam beton yang pada akhirnya akan menyebabkan turunnya kekuatan beton (Tri Mulyono, 2004).

2.4.2.4. Modulus Halus Butir

Modulus halus butir (*fineness modulus*) adalah suatu indeks yang dipakai untuk ukuran kehalusan atau kekasaran butir-butir agregat (Tjokrodinuljo, 1996). Makin besar nilai Modulus Halus Butir suatu agregat berarti semakin besar butiran agregatnya. Umumnya agregat halus mempunyai Modulus Halus Butir sekitar 1.5 – 3.8 dan kerikil mempunyai Modulus halus Butir 5 – 8. Untuk agregat

campuran nilai Modulus Halus Butir yang biasa dipakai sekitar 5.0 – 6.0 (Tri Mulyono, 2004).

2.4.2.5. Kadar Air Agregat

Kadar air pada suatu agregat (di lapangan) perlu diketahui untuk menghitung jumlah air yang diperlukan dalam campuran beton dan untuk mengetahui berat satuan agregat. Keadaan yang dipakai sebagai dasar hitungan adalah agregat kering oven dan jenuh kering muka karena konstan untuk agregat tertentu.

$$A_{tamb} = \frac{K - K_{jkm}}{100} \times W_{ag} \quad (2-1)$$

Keterangan:

A_{tamb} : air tambahan dari agregat (liter)

K : kadar air di lapangan (%)

K_{jkm} : kadar air jenuh kering muka (SSD) (%)

W_{ag} : berat agregat (kg)

2.4.2.6. Persyaratan Agregat

Persyaratan agregat halus:

1. Agregat halus harus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras. Butir-butir agregat halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan
2. Kandungan lumpur tidak boleh lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering), yang diartikan dengan Lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0.063 mm. Jika lebih dari 5% maka agregat harus dicuci
3. Tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak, yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-harder (dengan larutan NaOH). Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95% dari kekuatan adukan agregat yang sama tetapi dicuci

dalam larutan 3% NaOH yang kemudian dicuci hingga bersih dengan air, pada umur yang sama

4. Agregat halus harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan berturut-turut 31.5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm (PBI 1971), harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
 - a. Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat
 - b. Sisa di atas ayakan 1 mm, harus minimum 10% berat
 - c. Sisa di atas ayakan 0.25 mm, harus berkisar 80-95% berat
 - d. Untuk pasir modulus halus butir antara 2.5 – 3.8
 - e. Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk-petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui.

Persyaratan agregat kasar:

1. Agregat kasar untuk beton dapat berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batu-batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu. Yang dimaksud dengan agregat kasar adalah agregat dengan besar butir lebih dari 5 mm
2. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir-butir hanya dapat dipakai jika jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melampaui 20% dari berat agregat seluruhnya. Butir-butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan
3. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% (ditentukan terhadap berat kering), yang diartikan dengan Lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0.063 mm. Jika lebih dari 15% maka agregat harus dicuci
4. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti zat-zat reaktif alkali

5. Kekasaran dari butir-butir agregat kasar diperiksa dengan bejana penguji dari Rudeloff dengan beban pengujian 20 ton, dan harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
 - a. Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9.5 – 19 mm lebih dari 24% berat
 - b. Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 19 – 30 mm lebih dari 22% atau dengan mesin Los Angeles, di mana tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50%
6. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan berturut-turut 31.5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm (PBI 1971), harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
 - a. Sisa di atas ayakan 31.5 mm, harus 0% berat
 - b. Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 90-98% berat
 - c. Selisih antara sisa-sisa kumulatif di atas ayakan yang berurutan adalah maksimum 60% dan minimum 10% berat
 - d. Untuk pasir modulus halus butir antara 2.5 – 3.8
 - e. Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk-petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui.
7. Besar butir agregat maksimum yang tidak boleh lebih daripada seperlima jarak terkecil antara bidang-bidang sampai cetakan. Sepertiga dari tebal pelat atau tigaperempat dari jarak bersih minimum di antara batang-batang atau berkas-berkas tulangan. Penyimpangan dari pembatasan ini diizinkan apabila menurut pengawasan ahli cara-cara pengecoran beton adalah sedemikian rupa sehingga menjamin tidak terjadinya sarang-sarang kecil.

2.4.2.7. Pengujian Agregat

Pengujian agregat terdiri dari pemeriksaan kandungan lumpur dan kotoran organis yang terkandung dalam agregat, analisa saringan, analisa kadar air, berat jenis dan penyerapan air. Tujuan dari pemeriksaan kandungan lumpur dan kotoran organis pada agregat adalah menentukan banyaknya kandungan butir

lebih kecil dari 50 mikron (lumpur) yang terdapat dalam agregat dan menentukan prosentase zat organik yang terkandung dalam agregat. Tujuan dari analisa saringan yaitu menentukan modulus kehalusan. Modulus kehalusan adalah harga yang menyatakan tingkat kehalusan agregat yang nilainya seperseratus dari jumlah sisa agregat di atas saringan dengan diameter 0.15 mm.

Pemeriksaan kadar air dalam agregat bertujuan untuk menentukan prosentase air yang terkandung dalam agregat. Sedangkan tujuan dari pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat adalah untuk menentukan berat jenis dan prosentase berat air yang dapat diserap agregat, dihitung terhadap berat kering. Pada pemeriksaan kadar air, berat isi dan berat jenis dilakukan dalam kondisi asli, sedangkan kadar air SSD adalah kandungan air pada kondisi agregat jenuh air kering permukaan.

2.4.3. Air

Fungsi air pada campuran beton adalah untuk membantu reaksi kimia yang menyebabkan berlangsungnya proses pengikatan serta sebagai pelicin antara campuran agregat dan semen agar mudah dikerjakan dengan tetap menjaga workabilitas.

Air diperlukan pada pembentukan semen yang berpengaruh terhadap sifat kemudahan pengerjaan adukan beton (workabilitas), kekuatan, susut, dan keawetan beton. Air yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen hanya sekitar 25% dari berat semen saja, namun dalam kenyataannya nilai faktor air semen yang dipakai sulit kurang dari 25%. Kelebihan air dari jumlah yang dibutuhkan dipakai sebagai pelumas, tambahan air ini tidak boleh terlalu banyak karena kekuatan beton menjadi rendah dan beton menjadi keropos. Kelebihan air ini dituang (*bleeding*) yang kemudian menjadi buih dan terbentuk suatu selaput tipis (*laitance*). Selaput tipis ini akan mengurangi lekatan antara lapis-lapis beton dan merupakan bidang sambung yang lemah (Tjokrodinuljo, 1996).

Permukaan air untuk beton sebaiknya memenuhi persyaratan Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971.

1. Air untuk pembuatan dan perawatan beton tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, garam-garam, bahan-bahan organis atau bahan-bahan lain yang merusak beton dan atau baja tulangan. Dalam hal ini sebaiknya dipakai air bersih yang dapat diminum
2. Apabila terdapat keragu-raguan mengenai air, dianjurkan untuk mengirimkan air tersebut ke lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui untuk diselidiki sampai seberapa jauh air itu mengandung zat-zat yang dapat merusak beton dan atau tulangan
3. Apabila pemeriksaan contoh air disebut dalam ayat (2) tidak dapat dilakukan, maka dalam hal adanya keragu-raguan mengenai air harus diadakan percobaan perbandingan antara kekuatan tekan mortel semen + pasir dengan memakai air itu dan dengan memakai air suling. Air tersebut dianggap dapat dipakai, apabila kekuatan tekan mortel dengan memakai air itu pada umur 7 dan 28 hari paling sedikit adalah 90% dari kekuatan tekan mortel dengan memakai air suling pada umur yang sama
4. Jumlah air yang dipakai untuk membuat adukan beton dapat ditentukan dengan ukuran isi atau ukuran berat dan harus dilakukan setepat-tepatnya.

2.5. Workabilitas

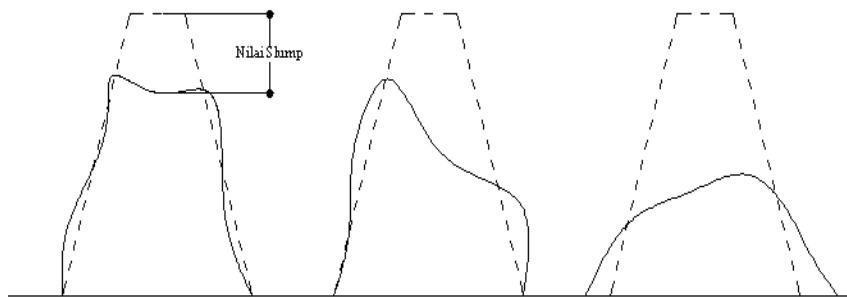
Workabilitas merupakan tingkat kemudahan pengerjaan adukan beton dalam pencampuran, pengangkutan, penuangan, dan pemadatan. Suatu adukan dapat dikatakan cukup *workable* jika memenuhi kriteria sebagai berikut:

- a. *Plasticity*, artinya adukan beton harus cukup plastis (kondisi antara cair dan padat), sehingga dapat dikerjakan dengan mudah tanpa perlu usaha tambahan ataupun terjadi perubahan bentuk dan adukan.
- b. *Cohesiveness*, artinya adukan beton harus mempunyai gaya-gaya kohesi yang cukup sehingga adukan masih saling melekat selama proses pengerjaan beton.
- c. *Fluidity*, artinya adukan harus mempunyai kemampuan untuk mengalir selama proses penuangan.
- d. *Mobility*, artinya adukan harus mempunyai kemampuan untuk bergerak / berpindah tempat tanpa terjadi perubahan bentuk.

Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan tingkat kelecakan atau keenceran adukan beton. Makin cair adukan maka makin mudah cara pengerjaannya. Untuk mengetahui kelecakan suatu adukan beton biasanya dengan dilakukan pengujian slump. Semakin tinggi nilai slump berarti adukan beton makin mudah dikerjakan.

Dalam praktek ada tiga macam tipe slump yang terjadi, yaitu:

- Slump* sebenarnya, terjadi apabila penurunannya seragam tanpa ada yang runtuh.
- Slump* geser, terjadi bila separuh puncaknya bergeser dan tergelincir ke bawah pada bidang miring.
- Slump* runtuh, terjadi bila kerucut runtuh semuanya.



Gambar 2.1. Tipe-tipe Keruntuhan *Slump* (1) *Slump* Sebenarnya (2) *Slump* Geser (3) *Slump* Runtuh (Sumber: Neville dan Brooks, 1987)

2.6. Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton (*concrete mix design*) dimaksudkan untuk mendapatkan beton dengan mutu sebaik-baiknya yaitu kuat tekan yang tinggi dan mudah dikerjakan. Adapun untuk perencanaan campuran beton pada penelitian ini digunakan metode DOE.

2.6.1. *Mix Design* Berdasarkan DOE (*Department of Environment*)

Langkah-langkah dalam perhitungan dan perencanaan beton dengan metode DOE adalah sebagai berikut:

1. Perencanaan Kuat Tekan Beton

Penentuan kuat tekan beton berdasarkan kekuatan beton pada umur 28 hari

2. Penetapan Nilai Standard Deviasi (S)

Penentuan nilai standar deviasi berdasarkan dua hal, yaitu:

- Mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran beton
- Volume pekerjaan

Nilai standard deviasi pada penelitian ini yaitu $S = 46$ (volume beton kurang dari 1000 m^3 dan mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran beton baik sekali), penetapannya sesuai dengan Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971.

3. Penetapan Kuat Tekan Rata-rata yang Direncanakan

Dengan menganggap nilai dari hasil pemeriksaan benda uji menyebar normal (mengikuti lengkung Gauss), maka kekuatan tekan beton karakteristik adalah:

$$\sigma'_{bk} = \sigma'_{bm} - 1.645 * S \quad (2-2)$$

Kuat tekan beton rata-rata dapat dihitung dengan rumus:

$$\sigma'_{bm} = \sigma'_{bk} + 1.645 * S \quad (2-3)$$

Keterangan:

σ'_{bm} : kuat tekan beton rata-rata (kg/cm^2)

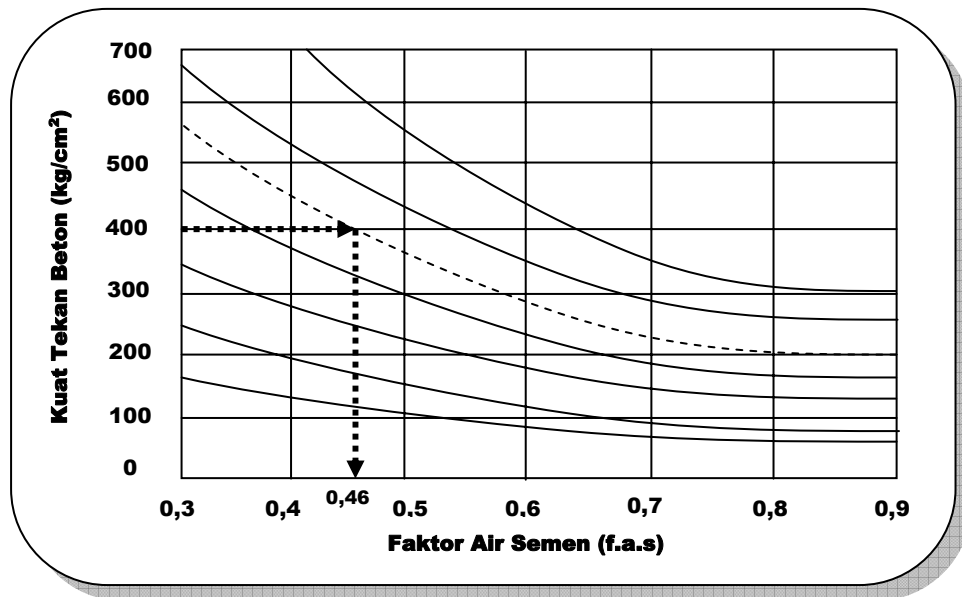
σ'_{bk} : kuat tekan beton yang direncanakan (kg/cm^2)

M : $1.645 * S$ = nilai tambah margin (kg/cm^2)

S : standard deviasi (kg/cm^2)

4. Mencari Faktor Air Semen (FAS)

Faktor air semen dicari dengan grafik hubungan kuat tekan dengan faktor air semen, sesuai dengan Teknologi Beton (Tri Mulyono, 2003).



Grafik 2.2. Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Faktor Air Semen (FAS)

5. Penentuan Nilai *Slump*

Penentuan nilai slump berdasarkan pemakaian beton untuk jenis konstruksi tertentu sesuai dengan Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI 1971).

6. Penentuan Nilai Kadar Air Bebas

Kadar air bebas ditentukan berdasarkan ukuran agregat, jenis batuan, dan nilai slump sesuai Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971.

7. Perhitungan Jumlah Semen yang Dibutuhkan

Kadar atau jumlah semen dapat dihitung dengan rumus:

$$KadarSemen = \frac{Kadarairbebas}{fas} \quad (2-4)$$

8. Penentuan Prosentase Jumlah Agregat Halus dan Kasar

Proporsi agregat halus harus ditentukan dengan metode penggabungan agregat dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Y = \frac{xa}{100} * ya + \left[\frac{100 - xa}{1000} \right] * yb \quad (2-5)$$

Keterangan:

Y : perkiraan persentase kumulatif lolos saringan # 9.6 dan # 0.6 menurut BS (*British Standard*) – 882, persentase kumulatif lolos # 9.6 dan # 0.6 bisa menggunakan *Spec – Ideal* 135 – 882, di mana:

- Perkiraan prosentase lolos ayakan # 9.6 = 50 %
- Perkiraan prosentase lolos ayakan # 0.6 = 18.5 %

Yb : persentase kumulatif pasir lolos ayakan # 9.6 dan 0.6

Ya : persentase kumulatif split lolos ayakan # 9.6 dan 0.6

Xa : konstanta yang dicari baik dari agregat halus maupun kasar

$$x_{\text{rata-rata}} = \frac{x_1 + x_2}{2} \rightarrow \text{prosentase dari agregat halus}$$

Prosentase dari agregat kasar (xb) = 100 %- xa

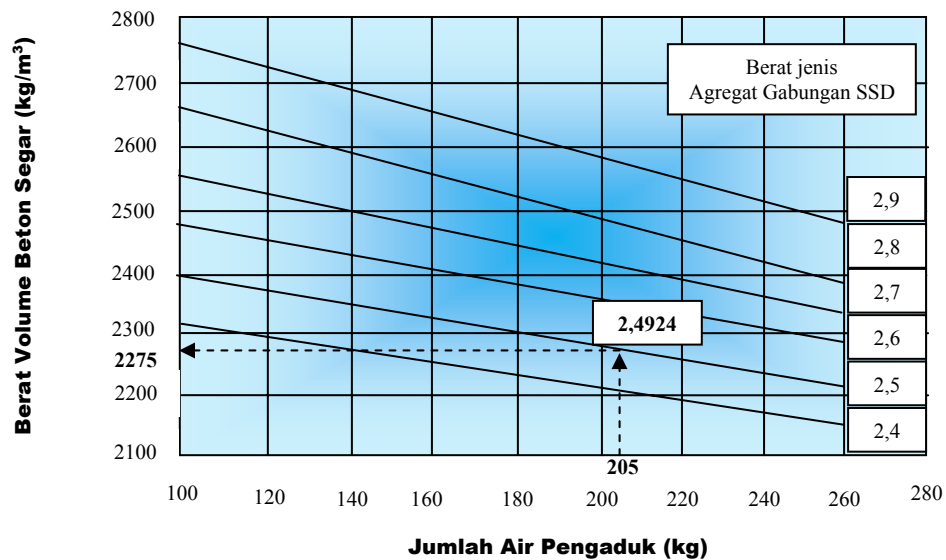
9. Penentuan Berat Jenis Gabungan

Berat jenis gabungan adalah gabungan dari berat jenis agregat halus dan agregat kasar dengan prosentase dari campuran agregat tersebut. Berat jenis gabungan dapat dihitung dengan rumus:

$$BJ_{gab} = \frac{xa}{100} * BJ_{xa} + \frac{xb}{100} * BJ_{xb} \quad (2-6)$$

10. Penentuan Berat Beton Segar

Berat beton segar dapat ditentukan dengan menggunakan grafik (sesuai Teknologi Beton, Tri Mulyono, 2003) berdasarkan data berat jenis gabungan dan kebutuhan air pengaduk untuk setiap meter kubik.



Grafik 2.3. Hubungan antara Berat Isi Campuran Beton, Jumlah Air Pengaduk, dan Berat Jenis SSD Agregat Gabungan

2.7. Penelitian Sejenis yang Pernah Dilakukan

Beberapa penelitian sejenis yang pernah dilakukan sebagai referensi tambahan yaitu:

1. Penelitian Pemanfaatan Limbah Padat (*Slag*) pada Proses Peleburan baja Sebagai Agregat Kasar pada Beton (Vena – Zuni, 2006)
 - Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pemanfaatan *slag* sebagai agregat kasar pada beton
 - Variasi *slag* 60% , 80 % , 100 %
 - Penelitian ini menggunakan benda uji silinder (15 x 30 cm) sebanyak 18 sampel per variasi dengan mutu f'_c 35 MPa
 - Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan yaitu:
 - a. Kuat tekan optimum pada variasi 100%
 - b. Kuat tarik optimum pada variasi 100%
 - c. Berat jenis beton berbanding lurus terhadap prosentase *slag*
 - d. Belum dapat ditentukan pola slump karena faktor suhu, agregat, teknis
 - e. Penggunaan *slag* aman terhadap lingkungan

- f. Harga beton berbanding terbalik terhadap prosentase *slag*
2. Penelitian Tinjauan Eksperimental Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah *Slag* (Lukman, Siti, 2007)
- Tujuan dari penelitian ini adalah:
 - a. Mengetahui karakteristik limbah *slag* dari industri peleburan baja
 - b. Mengetahui apakah limbah *slag* dari industri peleburan baja padat bisa dan baik difungsikan sebagai agregat kasar pada beton jika dilihat dari hasil kuat tekan dan kuat lenturnya
 - c. Tinjauan primer / utama : beton dengan 5 (lima) variasi prosentase *slag* dalam campurannya diperiksa terhadap kuat tekannya.
Tinjauan sekunder: beton dengan menggunakan 5 (lima) variasi prosentase *slag* dalam campurannya diperiksa juga terhadap kuat lentur, *workability*, dan *air content*-nya.
 - Variasi yang dilakukan adalah 0% , 10% , 30% , 50% , 70% dengan menggunakan satu mutu beton yaitu $f'c$ 35 MPa
 - Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa:
 - a. Kuat tekan beton meningkat seiring dengan penambahan prosentase *slag* pada campuran beton
 - b. Semakin besar prosentase *slag* dalam campuran beton semakin mudah dikerjakan (*workable*)
 - c. *Air content* semakin besar sebagai fungsi penambahan prosentase *slag* dalam campuran beton
 - d. Kuat lentur beton meningkat seiring dengan penambahan prosentase *slag* dalam campuran beton
 - e. Dari segi ekonomi harga beton mengalami penurunan seiring dengan penambahan kadar prosentase *slag* (0%, 10%, 30%, 50%, 70%)

3. Penelitian Penggunaan Limbah *Slag* Baja Sebagai Agregat Halus dan Agregat Kasar Terhadap Kekuatan Beton (Ken Wie L., 2008)

- Tujuan dari penelitian ini adalah: untuk mengetahui sejauh mana *slag* dapat menggantikan agregat (halus dan kasar) dan mengetahui peningkatan berat yang terjadi akibat pemakaian *slag* sebagai agregat halus pada pembuatan beton.
- Variasi prosentase *slag* kasar dan *slag* halus adalah 20% , 60% , dan 100% dengan mutu beton rencana $f'c$ 50 MPa dan diuji pada umur 28 hari.
- Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah:
 - a. Kuat tekan beton menurun pada semua varian, terutama pada prosentase *slag* 100%, di mana kuat tekan beton hanya mencapai 80% ketika *slag* kasar dan *slag* halus digunakan sebagai substitusi, kuat tekan beton sebesar 68% ketika *slag* halus digunakan sebagai substitusi, dan kuat tekan beton sebesar 30 % untuk *slag* halus dan slag kasar yang dicuci. Kuat tekan beton tersebut mengalami penurunan dari kuat tekan beton rata-rata variasi 0%
 - b. Penurunan kualitas beton ditengarai oleh penggunaan *slag* halus, terutama pada *slag* halus yang dicuci
 - c. *Workability* meningkat sebanding dengan kenaikan prosentase variasi *slag* akibat kecilnya daya serap *slag*
 - d. *Slag* halus dapat digunakan sebagai bahan campuran beton non-struktural.

4. Penelitian Pemanfaatan *Slag* Besi Sebagai Agregat Kasar dalam Campuran Beton (Agus Setiawan dan Widiya Suseno, Dosen Jurusan Teknik Sipil UNIKA Soegijapranata)

- Tujuan dari penelitian ini adalah: menguji sifat-sifat mekanik beton *slag* besi yang meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan modulus elastisitas.

- Penelitian ini menggunakan 3 (tiga) jenis campuran yang direncanakan sesuai standard ACI-211.4R-93 dengan target mutu beton 50 MPa , 60 MPa , dan 70 MPa. Pengujian terhadap sifat-sifat mekanik beton *slag* besi dilakukan terhadap benda uji berumur 7 dan 28 hari.
- Penelitian tersebut memberikan kesimpulan bahwa:
 - a. Perencanaan campuran beton dengan metoda ACI-211.4R-93 yang sebenarnya diperuntukkan bagi agregat alam dapat pula dipakai untuk merencanakan campuran beton dengan menggunakan *slag* besi sebagai agregat kasar
 - b. Semakin tinggi kuat tekan beton, sifatnya semakin getas sehingga kemampuannya menahan tarik (baik tarik belah maupun tarik dalam lentur) menjadi lebih kecil
 - c. Nilai Modulus Elastisitas beton *slag* berbanding lurus dengan nilai kuat tekan yang dicapainya. Semakin tinggi kuat tekan makin tinggi pula nilai Modulus Elastisitas
 - d. Besarnya berat jenis beton menggunakan *slag* besi sebagai agregat kasar rata-rata adalah sekitar $\pm 2610 \text{ kg/m}^3$. Jika beton *slag* ini digunakan dalam konstruksi bangunan akan menghasilkan beban mati yang lebih besar dari pada beton normal (2400 kg/m^3), namun kekurangan tersebut dapat tertutup dengan kuat tekan beton *slag* yang tinggi. Kuat tekan beton yang tinggi akan mampu mengurangi dimensi struktur sehingga menjadi lebih ramping.